

УДК 621.384.8

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННЫХ БЛОКОВ МАСС-СПЕКТРОМЕТРА МТИ-350 Г

А.В. Сапрыгин, В.А. Калашников, Ю.Н. Залесов, С.И. Швецов
Уральский электрохимический комбинат
624130, Новоуральск Свердловской обл., Дзержинского, 2
vak@ueip.ru

На сегодняшний день в масс-спектрометрической лаборатории ЦЗЛ УЭХК в эксплуатации находится множество современных масс-спектрометров различного назначения, и, кроме того, разрабатываются и производятся новые модели масс-спектрометров. Цель настоящей статьи - рассмотреть основные принципы построения отдельных каналов различных масс-спектрометров: канала питания электромагнита анализатора и канала регистрации ионных токов, а также шинные интерфейсы, используемые для связи масс-спектрометров с компьютерами, и провести их сравнение.

При проектировании электронных схем масс-спектрометра МТИ-350Г, за основу были взяты схемы, широко используемые в масс-спектрометрической аппаратуре и хорошо зарекомендовавшие себя в работе, но сами схемы выполнены с использованием современной элементной базы. Для оценки преимуществ и недостатков схем, использованных в МТИ-350 Г, проведем сравнение принципов построения и схемных решений МТИ-350 Г и некоторых других масс-спектрометров, эксплуатируемых в лаборатории. Для этого рассмотрим каналы стабилизации магнитной индукции, каналы регистрации ионных токов и шинные интерфейсы, используемые для связи масс-спектрометров с компьютерами, в масс-спектрометрах: МАТ-281, МАТ-262, МИ-1201АГ, МИ-1201АГМ, МИ-1201Н и МТИ-350Г.

1. Канал питания электромагнита анализатора

Канал питания электромагнита анализатора предназначен для питания обмотки электромагнита током, обеспечивающим в межполюсном

зазоре электромагнита стабильную индукцию, или индукцию, изменяемую по заранее заданной программе.

Рассмотрим некоторые примеры реализации канала электромагнита анализатора.

Масс-спектрометры Finnigan MAT 262 и Finnigan MAT 281

Каналы стабилизации магнитной индукции в приборах МАТ 262 и МАТ 281 1993 г. выпуска построены по единой схеме с использованием катушек обратной связи в качестве датчика магнитного поля [1]. Измерительная катушка выполнена в виде небольшого датчика, устанавливаемого непосредственно в рабочий зазор между полюсными наконечниками магнита анализатора. В случае изменения величины магнитного поля, сигнал с измерительной катушки усиливается на промежуточном усилителе, складывается с напряжением, поступающим с датчика тока катушек возбуждения электромагнита, и подается на усилитель ошибки, сравнивающий полученное напряжение с величиной опорного напряжения, задающего необходимое значение магнитного поля.

Датчиком тока катушек возбуждения электромагнита является сопротивление 0,1 Ом, включенное последовательно с катушками возбуждения электромагнита. Опорное напряжение, задающее величину магнитного поля, задается либо вручную с помощью потенциометров, либо автоматически от компьютера с помощью 24-разрядного ЦАП.

Регулирующий элемент в данной схеме масс-спектрометра выполнен по схеме линейного регулятора, состоящего из регулируемого источника питания и транзисторных ячеек управления. Мощный регулируемый источник питания выполнен по схеме линейного стабилизатора проходного типа с четырьмя силовыми транзисторными ячейками.

Канал стабилизации магнитной индукции позволяет добиться стабильности сигнала на склоне пика не хуже: $\pm 2 \cdot 10^{-5}$ за 20 мин.

Серия масс-спектрометров МИ-1201АГ, МИ-1201АГМ-01 и МИ-1201АГМ-02

Работает канал питания электромагнита анализатора данной серии масс-спектрометров следующим образом.

С зажимов измерительной катушки ИК снимается напряжение обратной связи, которое поступает на вход интегрирующего усилителя, расположенного в стабилизаторе развертки, усиливается и поступает на формирователь импульсов тока в качестве управляющего сигнала $U_{упр}$ [2].

Интегрирующий усилитель стабилизатора развертки выполнен по схеме МДМ усилителя, собранного на базе нескольких операционных усилителей, и модуляторов на полевых транзисторах. Отрицательными чертами подобной схемы являются чувствительность к элементной базе и сложность настройки.

Формирователь выполнен по схеме понижающего широтно-импульсного преобразователя с тремя биполярными ключевыми транзисторами. Диапазон регулирования тока магнита составляет от 0,2 до 16 А.

Нестабильность тока электромагнита (ЭМ) по дрейфу и флуктуациям в данных масс-спектрометрах не превышает $\pm 5 \cdot 10^{-5}$ за 30 мин после установки дрейфа нуля интегрирующего усилителя.

Масс-спектрометр МИ-1201Н

Канал питания данного электромагнита выполнен по тем же принципам, что и МИ-1201АГ [3], но с небольшими доработками: интегрирующий усилитель собран на специализированном операционном усилителе КР140УД24, внутренняя структура которого также выполнена по МДМ

схеме, а формирователь выполнен по упрощенной схеме преобразователя с использованием современных составных транзисторов.

Нестабильность тока ЭМ по дрейфу и флуктуациям в данном масс-спектрометре не превышает $\pm 5 \cdot 10^{-5}$ за 30 мин после установки дрейфа нуля интегрирующего усилителя.

Масс-спектрометр МТИ-350Г

Канал стабилизации магнитной индукции данного масс-спектрометра построен на тех же принципах, что и в масс-спектрометрах МИ-1201АГ, но с использованием другой элементной базы и других конструкторских решений [4].

Схема канала стабилизации магнитной индукции МТИ-350Г приведена на рис. 1. Стабилизация магнитной индукции в масс-спектрометре осуществляется с использованием измерительных катушек обратной связи. Катушки обратной связи выполнены секционными с целью обеспечения их надежности и из-за технологических требований. Каждая катушка состоит из 12 секций.

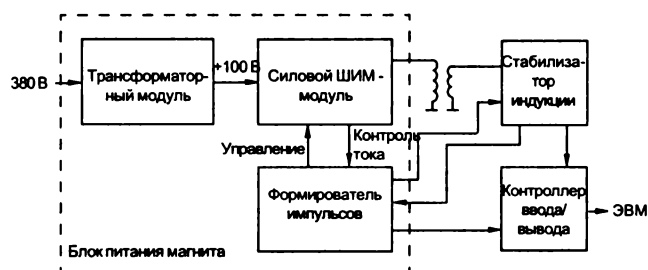


Рис.1. Схема канала стабилизации магнитной индукции МТИ-350Г

Схема стабилизации имеет интегрирующий усилитель, выполненный на микросхеме КР140УД24 и предназначенный для интегрирования сигналов, поступающих на вход стабилизатора от измерительных катушек, от блока питания магнита и от генератора цифровой развертки.

Формирователь выполнен по схеме понижающего широтно-импульсного преобразователя с ключевым элементом на одном МОП транзисторе. Диапазон регулировки тока составляет от 0,2 до 20 А.

Канал стабилизации магнитной индукции позволяет добиться стабильности сигнала на склоне пика не хуже: $\pm 2 \cdot 10^{-5}$ за 20 мин.

2. Канал регистрации ионного тока

Канал регистрации ионного тока предназначен для измерения и преобразования ионных токов в цифровой код и ввода результатов в ЭВМ для последующей обработки.

Каналы регистрации всех рассматриваемых масс-спектрометров построены по одинаковым функциональным схемам, включающим в себя электрометрические усилители (УЭ), преобразователи напряжения в частоту (ПНЧ), гальваническую развязку, преобразователи частоты в код (ПЧК) и интерфейсы для ввода кода в ЭВМ. Все схемы регистрации многоканальные.

Использование преобразования измеряемого напряжения в частоту позволяет осуществить аппаратное усреднение измеряемого сигнала и упростить гальваническую развязку и обработку полученного кода.

Рассмотрим некоторые примеры реализации канала регистрации ионных токов.

Масс-спектрометр Finnigan MAT 281

В данном приборе канал регистрации ионных токов имеет 4 идентичных канала с электрометрическими усилителями и один канал с ВЭУ. Каждый электрометрический усилитель содержит два каскада на операционных усилителях: первый каскад – это операционный усилитель со сверхмалыми входными токами, а второй каскад – это прецизионный усилитель с большим коэффициентом усиления, имеющий частотную коррекцию АЧХ. Усилитель ВЭУ выполнен в виде двух последовательно включенных инвертирующих операционных усилителей.

ПНЧ выполнены по стандартной схеме на отдельных элементах. Максимальная частота преобразования ПНЧ составляет 40 кГц при сигнале -9 В на входе ПНЧ.

Сигналы с ПНЧ проходят через оптронную гальваническую развязку и преобразуются в позиционный двоичный код с помощью 24-разрядных счетчиков. Далее цифровой код через шину IEC625 передается в компьютер.

Масс-спектрометры МИ-1201АГ и МИ-1201АГМ

В данной серии масс-спектрометров используется 5 каналов регистрации с электрометрическими усилителями и один канал с ВЭУ.

Электрометрические усилители имеют два каскада: усилитель на электрометрической лампе типа ЭМ-6 и дифференциальный усилитель на ОУ.

ПНЧ выполнены по стандартной схеме с частотой преобразования 250 кГц при напряжении на входе -9В. После прохождения гальванической развязки, сигнал с ПНЧ поступает на контроллер ПНЧ, в котором осуществляется преобразование частоты в позиционный двоичный 32 разрядный код с помощью интегральных программируемых счетчиков типа

ВИ53. Полученный код через шину И-41 считывается в компьютер для дальнейшей обработки.

Масс-спектрометры МИ-1201АГМ-01 и МИ-1201АГМ-02

Каналы регистрации ионных токов данных масс-спектрометров почти не отличаются от каналов регистрации МИ-1201АГ, МИ-1201АГМ, за исключением того, что в данных масс-спектрометрах входные УЭ выполнены на микросхемах КР140УД026. Внешняя регулировка напряжения смещения нуля отсутствует. Электрометрические усилители в данных масс-спектрометрах могут работать с двумя различными измерительными сопротивлениями, переключение которых осуществляется с помощью герконовых реле, установленных на платах усилителя.

Масс-спектрометр МИ-1201Н

Данный масс-спектрометр имеет два идентичных канала преобразования, и один измерительный канал для организации автоматической настройки на центр пика. Все каналы имеют одинаковые УЭ. ВЭУ в масс-спектрометре отсутствует.

Каждый усилитель выполнен на одном ОУ AD549LJ, имеющем малые входные токи. Ток с коллектора приемника ионов, протекает по измерительному резистору, который охватывает усилитель стопроцентной отрицательной обратной связью. Последовательно с резистором обратной связи в цепь включен дополнительный резистор, на который подается потенциал смещения нуля.

Регулировка смещения нуля осуществляется потенциометром, находящимся на передней панели блока регистрации масс стойки управления. Напряжение, подаваемое на потенциометр, формируется с помощью дополнительного источника напряжения, имеющего гальваническую развязку от остальных схем.

ПНЧ данного масс-спектрометра имеет только два канала, т.к. третий усилитель используется только в схеме автоподстройки луча для настройки на центр пика. ПНЧ выполнены по стандартной схеме с частотой преобразования 250 кГц при напряжении на входе -9В. После прохождения гальванической развязки, сигнал с ПНЧ поступает на контроллер регистрации, в котором осуществляется преобразование частоты в позиционный двоичный 32 разрядный код с помощью интегральных программируемых счетчиков типа ВИ53. Полученный код считывается компьютером для дальнейшей обработки.

Масс-спектрометр МТИ-350Г

В данном приборе используется 4 идентичных канала с электрометрическими усилителями и один канал с ВЭУ. Структурная схема канала регистрации ионного тока приведена на рис. 2.

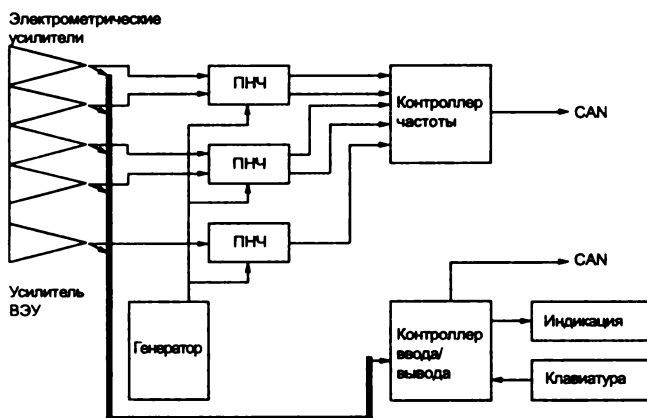


Рис.2. Структура канала регистрации ионного тока МТИ-350Г

В состав приемника входит система коллекторов, предназначенная для приема ионных пучков, электрометрические усилители, осуществляющие преобразование принятых ионных токов в напряжение, и устройство коммутации коллекторов, служащее для реализации возможности коммутации коллекторов к различным электрометрическим усилителям.

Электрические схемы электрометрических усилителей МТИ-350Г выполнены по той же схеме, что и в МИ-1201Н. Каждый канал имеет внешнюю регулировку смещения нуля электрометрического усилителя.

ПНЧ выполнены по стандартной схеме с частотой преобразования 250 кГц при напряжении на входе -9В. Контроллер ПНЧ имеет 32-разрядные счетчики, выполненные на основе интегральной микросхемы типа 82С54.

Кроме того, напряжение с выходов электрометрических усилителей подается на АЦП контроллера индикации для отображения на индикаторе блока регистрации масс-спектра управления.

3. Шинные интерфейсы, используемые масс-спектрометрами для связи с компьютерами

Шинные интерфейсы необходимы для реализации информационного обмена между отдельными блоками масс-спектрометра и управляющим компьютером.

Масс-спектрометр Finnigan MAT 281

В данном масс-спектрометре все основные блоки объединены между собой с помощью шины

IEC625, которая подключается к компьютеру с помощью адаптера, вставляющегося в ISA-слот шины расширения компьютера. Кроме блоков масс-спектрометра, шина IEC625 также используется для подключения печатающего устройства и внешнего магнитного носителя для хранения данных.

IEC625 это двунаправленная шина с довольно сложной организацией, имеющая 42 линии для передачи адреса, данных и сигналов управления. Эта шина является очень экзотической, а информация по данной шине отсутствует.

Серия масс-спектрометров МИ-1201АГ, МИ-1201АГМ-01 и МИ-1201АГМ-02

В данной серии масс-спектрометров почти все электронные блоки имеют контроллеры, через которые осуществляется информационный обмен с компьютером. Все контроллеры объединены между собой шинной магистралью И-41, которая управляется от ЭВМ с помощью плат сопряжения, одна из которых устанавливается в масс-спектрометр, а вторая устанавливается в ISA-слот расширения компьютера. Использование ISA-шины расширения позволяет поддерживать скорость обмена по шине до 8 Мбайт/с.

Шина И-41 представляет из себя асинхронную двунаправленную шину, имеющую 8 разрядов адреса, 8 разрядов данных и сигналы управления #RD и #WR. Обмен информацией по шине осуществляется только под управлением ЭВМ.

Негативными чертами использования данного шинного интерфейса являются необходимость использования ISA-шины компьютера, создание отдельных контроллеров для каждого блока и необходимость их размещения в отдельной корзине, а также отсутствие гальванической развязки между компьютером и масс-спектрометром.

Использование ISA-шины не желательно из-за того, что производители современных компьютеров стали отказываться от ее использования в составе компьютера. Поэтому в масс-спектрометре МИ-1201АГМ-02 был применен расширитель магистрали, использующий для связи с компьютером COM-порт компьютера, что существенно ограничило пропускную способность магистрали на уровне 14 400 кбайт/с, но обеспечило гальваническую развязку компьютера от масс-спектрометра.

В масс-спектрометре МИ-1201-АГМ-02 для связи компьютера с пультом управления клапанами системы напуска и с блоком питания системы напуска использована шина CAN.

Масс-спектрометр МИ-1201Н

В данном масс-спектрометре в ISA-слоты

расширения компьютера устанавливаются две платы, осуществляющие непосредственное управление блоками масс-спектрометра: Контроллер регистрации и развертки, и Контроллер управления.

Контроллер регистрации и развертки осуществляет преобразование частотного сигнала от ПНЧ в двоичный позиционный код, а также осуществляет управление магнитом анализатора.

Контроллер управления осуществляет управление клапанами системы напуска и включением схемы автоподстройки и включения луча.

Обе платы имеют оптронную гальваническую развязку с масс-спектрометром. Наличие гальванической развязки обеспечивает защиту компьютера от повреждения блуждающими токами при отсутствии или низком качестве заземления и повышает надежность системы в условиях воздействия неблагоприятных факторов.

Использование двух ISA плат хоть и позволяет осуществлять высокоскоростной обмен данными по шине, но приводит к проблемам с комплектацией масс-спектрометров компьютерами, т.к. в современных компьютерах шина ISA отсутствует, а во многих старых компьютерах зачастую имеется только один слот расширения шины ISA.

Необходимо отметить, что все рассмотренные выше масс-спектрометры работают под управлением персональных компьютеров общего назначения.

Масс-спектрометр МТИ-350Г

В данном масс-спектрометре использовано устройство накопления и обработки информации (спецвычислитель), которое служит для реализации возможностей информационного обмена, обеспечения управления работой узлов прибора, сбора, накопления, обработки информации и расчета результатов. Спецвычислитель представляет собой электронно-вычислительную машину (ЭВМ) стандарта IBM PC, выполненную на шасси промышленного компьютера, обладающего повышенными характеристиками надежности и отказоустойчивости. Информационный обмен спецвычислителя с блоками масс-спектрометра осуществляется с помощью шинного интерфейса CAN.

В качестве базового конструктива спецвычислителя использовано шасси типа IPC-623 фирмы "Advantech", которое может вместить до 20 плат расширения с шиной ISA/PCI и стандартно комплектуется резервированными источниками питания мощностью до 300 Вт с возможностью "горячей" замены.

В шасси устанавливается переключатель MKR-40-1EM-25R, к которому подключаются компьютеры PCA-6751 и PCA-6168, а также клавиатуры и мыши.

Одноплатный промышленный компьютер PCA-6751 — это процессорная плата половинного размера с шиной ISA с установленным на плате процессором Pentium 166. Универсальная плата PCA-6751 оснащена мощными встроенными функциями, такими как видеоконтроллер, сетевой контроллер и твердотельный диск.

Компьютер PCA-6168 — это процессорная плата половинного размера с процессором Intel Celeron частотой 400 МГц. На плате имеются: встроенный высокоскоростной контроллер IDE, видеоконтроллер SVGA на шине AGP, сетевой адаптер Ethernet 100 Base-T, контроллер Ultra Wide SCSI. Операционная система - Windows NT 4.0.

В шасси устанавливаются две платы PCL-841 предназначены для подключения устройства накопления и обработки информации к промышленной сети CAN. Передача данных по каналу CAN может осуществляться со скоростью до 1 Мбит/с. Кроме того, CAN имеет гальваническую развязку.

CAN – последовательный протокол связи, обладающий высоким уровнем надежности информационного обмена. Основные характеристики и принципы построения закреплены в стандарте ISO 11898. CAN – узел представляет из себя автономный электронный модуль, оснащенный однокристалльным микроконтроллером и CAN – контроллером. Микроконтроллер обеспечивает работу узла в соответствии с заложенным алгоритмом, а контроллер CAN реализует высокоскоростной обмен между процессором и шиной CAN с помощью встроенных аппаратных средств. В электронных блоках, используемых в масс-спектрометре МТИ-350Г, используется универсальный контроллер, разработанный ОКБ приборного завода УЭХК.

Из приведенных выше описаний видно, что использование достижений современной электроники позволяет выполнять хорошо отработанные, проверенные схемы на новом уровне. Использование новых интегральных компонентов позволяет заменить целые блоки схем единичными интегральными элементами, тем самым значительно упростив разработку и конструирование блоков, свести к минимуму влияние внешних факторов, шумов и наводок, упростить настройку схем, существенно повысить их надежность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Finnigan Mat. Massenspektrometer Mat 281. Manual. 1993. 140 с.
2. 3.394.044 ТО. Масс-спектрометр МИ-1201АГ. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Сумы (Украина): "Селми", 1990. 158 с.
3. еК3.394.001 РЭ. Масс-спектрометр МИ-1201-Н. Руководство по эксплуатации. Новоуральск: УЭХК, 2002. 67 с.
4. еК1.157.017 ОП. Комплекс средств управления масс-спектрометра. Чертежи и схемы. Новоуральск: УЭХК, 2003. 90 с.

* * * * *

ELABORATION OF MTI-350 G MASS SPECTROMETER ELECTRONIC UNITS

A.V.Saprygin, V.A.Kalashnikov, Yu.N.Zalesov, S.I.Shvetzov

For today in mass-spectrometric laboratory of Analytical Centre of UEIP, in operation there is a plenty of modern mass-spectrometers of various purpose, and moreover, the new models of mass-spectrometers are developed and are made. The purpose of this article is to review basic principle of construction the separate canals of mass-spectrometers: the canal of power supply for electromagnet analyzer, the canal of ionic current record, and also the computer interfaces, which are used to connect the mass-spectrometers with computer.
